

## 2.3. Arcul electric

Deconectarea (sau deschiderea) sub sarcină a unui circuit electric este însoțită de apariția unui **arc electric** între elementele de contact ale echipamentului de comutație.

Existența arcului electric conduce la o solicitare suplimentară a aparatului electric, cauzată de transferul de energie din coloana arcului electric către piesele componente (conductoare și/sau izolante) ale aparatului.

Pe de altă parte, dacă procesul de apariție a arcului electric nu ar exista, ar apărea greutăți în funcționarea instalațiilor electrice, întrucât toată energia câmpului magnetic (a sistemului) s-ar transforma, la întreruperea circuitului, în energie a câmpului electric, conducând la apariția de supratensiuni periculoase. Ori prezența arcului electric face ca energia magnetică a sistemului să se transforme în energie termică.

Și la închiderea circuitelor electrice poate să apară un arc electric (între elementele de contact ale aparatului de comutație) dar, pentru că viteza de închidere a contactelor este mare, efectul termic al acestui arc electric este mic.

Studiul fizicii arcului electric, cunoașterea proprietăților lui, prezentarea aspectelor teoretice ale tehnicii întreruperii și analiza principiilor folosite în scopul suprimării arcului au importanță atât pentru proiectarea și construcția aparatelor de comutație cât și pentru exploatarea aparatelor electrice.

### 2.3.1. Proprietățile arcului electric

Arcul electric reprezintă o **descărcare autonomă într-un gaz** (aer, hexafluorură de sulf ( $SF_6$ ), azot ( $N_2$ ), etc.), caracterizată prin *temperatură înaltă, densitate mare de curent* (la electrod) și *cădere mică de tensiune* (adică, un gradient redus al tensiunii în coloana arcului).

Caracteristica principală a descărcării în gaze (a arcului electric) este proprietatea spațiului de gaz (în general izolant) de a deveni bun conductor electric. Conductibilitatea electrică a gazului este determinată de densitatea purtătorilor de sarcină liberi și de viteza lor de deplasare spre cei doi electrozi, și variază cu densitatea, cu temperatura, cu natura mediului și cu intensitatea câmpului electric.

Descărcarea autonomă este caracterizată prin existența unei **ionizări** suficient de intense care să permită formarea avalanșei de electroni și de ioni.

Trecerea de la descărcarea neautonomă la cea autonomă are loc atunci când nu mai este necesar un agent exterior de ionizare.

Procesul de ionizare este dependent de câmpul electric și de presiunea gazului respectiv. Dacă între cele două elemente de contact (aflate la distanța  $d$ ) se consideră o repartiție uniformă a câmpului electric ( $E = ct.$ ), tensiunea  $U$  aplicată la electrozi rezultă de forma:  $U = E \cdot d$ .

Valoarea tensiunii  $U$  aplicată la electrozi, pentru care are loc trecerea de la descărcarea neautonomă la cea autonomă se numește **tensiune de aprindere** și se notează cu  $U_a$  [V].

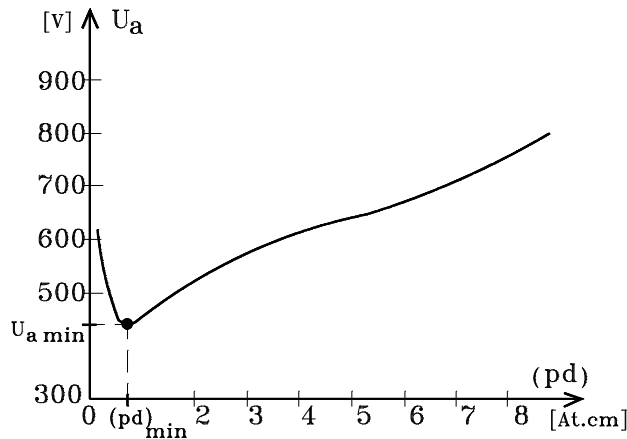


Fig. 2.38 Curba străpunerii lui Paschen  $U_a = f(pd)$ .

Tensiunea de

aprindere este aceeași cu tensiunea de străpungere  $U_s$  a dielectricului gazos dintre electrozi.

În fig. 2.38 este reprezentată curba tensiunii de aprindere a arcului în aer  $U_a$  în funcție de produsul presiune -distanță  $(p \cdot d)$  dintre electrozi. Astfel, variind distanța  $(d)$  și presiunea gazului  $(p)$  se poate păstra constantă tensiunea de aprindere.

Dependența  $U_a = f(p \cdot d)$  este cunoscută ca **Legea lui Paschen** și este valabilă în câmpuri uniforme. Minimul curbei lui Paschen definește tensiunea minimă de străpungere a spațiului dintre electrozi plani într-un mediu gazos.

Pentru valori mari ale presiunii, adică pentru  $p \cdot d > (p \cdot d)_{\min}$ , drumul liber mediu al electronilor este micșorat, iar ciocnirile între electroni și atomii de gaz vor fi elastice. În aceste condiții, pentru a produce ionizarea prin șoc este necesar ca intensitatea câmpului electric  $E$  (și prin urmare și  $U$ ) să crească.

Invers, la valori mai mici ale presiunii - pentru  $(p \cdot d) < (p \cdot d)_{\min}$  - drumul liber mediu crește. Prin urmare, crește și posibilitatea ionizării la ciocnirile unui electron cu un atom neutru, însă probabilitatea ciocnirilor este redusă. Pentru a se produce descărcarea autonomă este necesar să crească probabilitatea ionizării prin șoc, iar singura cale, în acest caz, este creșterea intensității câmpului electric  $E$ , deci și a tensiunii  $U$  aplicate electrozilor.

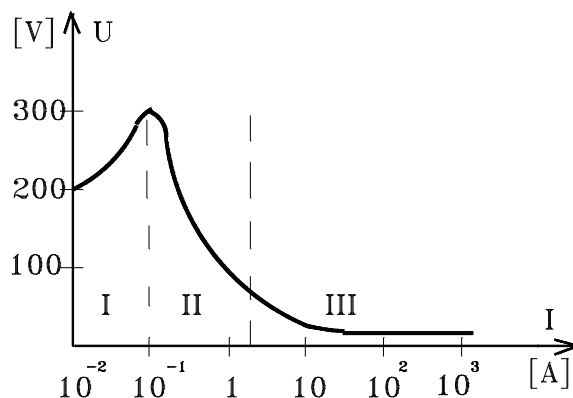


Fig. 2.39 Caracteristica tensiune-curent la descărcarea în gaze.

În fig. 2.39 este reprezentată caracteristica tensiune-curent  $U = f(I)$  a descărcării în gaze.

**Descărcarea luminiscentă (zona I)** are loc pentru o cădere de tensiune catodică de  $200 \dots 250 \text{ V}$  și un curent de  $10^{-5} \dots 10^{-1} \text{ A}$ .

O creștere a curentului până la  $1 \text{ A}$  determină o cădere bruscă a tensiunii, reprezentând așa-numita **regiune de trecere (zona II)**, în care descărcările nu sunt stabile și au loc numai în regim tranzitoriu.

După această zonă, la creșterea curentului apare **descărcarea prin arc electric (zona III)**, caracterizată de o cădere de tensiune catodică mică ( $10 \dots 20 \text{ V}$ ) și o densitate de curent foarte mare (până la  $10^5 \text{ A/cm}^2$ ).

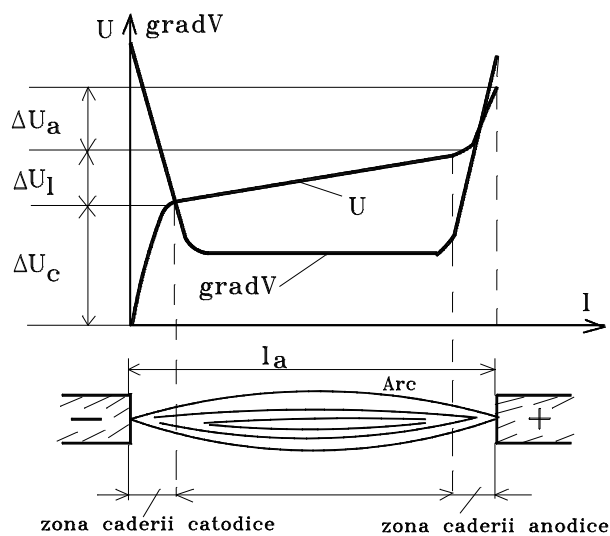


Fig. 2.40 Căderea de tensiune  $U$  și gradientul de potențial  $\text{gradV}$  pe lungimea arcului.

Variația căderii de tensiune  $U$  și a gradientului de potențial  $\text{gradV}$  pe lungimea arcului sunt arătate în fig. 2.40. Se observă că lângă catod are loc o variație bruscă a tensiunii, denumită **cădere de tensiune catodică**  $\Delta U_c$ .

În lungul coloanei arcului tensiunea  $\Delta U_I$  crește uniform, în această porțiune gradientul tensiunii fiind constant.

Lângă anod are loc, de asemenea, o variație bruscă de tensiune, denumită **cădere de tensiune anodică**  $\Delta U_a$ , mai mică decât căderea de tensiune catodică și dependentă de curent. Căderile de tensiune de lângă electrozi sunt concentrate pe porțiuni foarte mici din lungimea arcului (de circa  $10^{-4}$  cm).

Prin urmare, *tensiunea în lungul arcului* (sau *căderea de tensiune în arc*) se poate exprima prin relația:

$$U = \Delta U_c + \Delta U_l + \Delta U_a, \quad (2.265)$$

unde  $\Delta U_l = \text{grad} V \cdot l_a$  este căderea de tensiune în coloana arcului,  $l_a$  fiind lungimea arcului.

În cazul contactelor din același material, pentru același mediu, aceeași presiune și temperatură, căderea de tensiune în coloana arcului  $\Delta U_l$  este independentă de curentul din arc.

Deci, **arcul electric** se poate considera ca un **conductor electric a cărui secțiune se ajustează în mod automat la curentul care trece prin el**.

Pentru a putea fi înțelese procesele ce au loc în coloana arcului trebuie cunoscute procesele de ionizare și de deionizare a spațiului de arc.

### 2.3.2. Procese de ionizare a arcului electric

#### 2.3.2.1. Ionizarea prin ciocniri

Electronii liberi, care se găsesc întotdeauna în spațiul dintre electrozi, se deplasează cu viteză mare spre anod, sub acțiunea câmpului electric existent. În drumul lor, acești electroni produc ionizarea, prin ciocniri, a particulelor neutre.

Ionizarea prin ciocniri depinde de presiunea gazului, de potențialul de ionizare a moleculelor gazului din spațiul de arc și de tensiunea aplicată. Creșterea presiunii gazului în jurul arcului atenuează procesul de ionizare.

La deschiderea contactelor, datorită creșterii rapide a distanței dintre elementele de contact, intensitatea câmpului electric  $E$  din coloana arcului scade și, prin urmare, ionizarea prin ciocniri (singură) nu poate asigura conductibilitatea necesară a spațiului de descărcare în arc.

#### 2.3.2.2. Ionizarea prin emisie

Emisia de electroni de la suprafața catodului se face prin:

- *emisie (auto)electronică* produsă de un câmp electric intens în regiunea catodului;

- *emisie termoelectronică*.

**Emisia autoelectronică** are loc în primele momente după separarea contactelor, când, distanța între elementele de contact fiind foarte mică, apare un gradient de potențial foarte mare, care poate genera smulgerea de electroni de la suprafața catodului. După deschiderea contactelor, întrucât distanța dintre elementele de contact crește rapid, gradientul de potențial electric scade mult, ducând la dispariția fenomenului.

Emisia de electroni de la suprafața catodului nu încetează odată cu terminarea emisiei autoelectronice. Ea se continuă prin **emisia termoelectronică** de la suprafața încălzită a petei catodice.

În general, arcul electric se produce prin depărtarea piesei mobile a unui contact electric. În rezistența de contact se dezvoltă căldură, temperatura elementelor de contact crește și prin aceasta se favorizează emisia termoelectronică.

### 2.3.2.3. Ionizarea termică

Procesul de ionizare în coloana arcului se datorează (în cea mai mare parte) temperaturii înalte a gazului, **ionizarea termică fiind fundamentală și, practic, singura care contribuie la procesul de dezvoltare și de menținere a arcului electric.**

În arcul electric există următoarele categorii de purtători de sarcină:

- *electronii* (cu sarcina electrică  $-e$ );
- *ionii pozitivi*, rezultați din pierderea unui sau mai multor electroni (deci cu sarcina electrică  $e, 2e, 3e \dots$ );
- *ionii negativi*, care rezultă prin captarea de către atomii neutri a unui sau mai multor electroni (sarcina electrică a acestora fiind  $-e, -2e, -3e \dots$ ).

Toți acești purtători de sarcină sunt vehiculați către electrozii de semn contrar sarcinii lor. În circuitul exterior, curentul electric apare odată cu inițierea deplasării purtătorilor de sarcină.

Prin urmare, **arcul electric este un flux de electroni și de ioni**, care are în zona sa centrală o temperatură foarte ridicată ( $5000 \dots 10000 \text{ K}$ , iar în cazuri deosebite chiar  $50000 \text{ K}$ ).

Starea de agregare a gazului în coloana arcului electric se numește **plasmă**, care, în esență, este un *gaz ionizat*.

Fluxul de electroni și ioni constituie miezul arcului (zona axială), a cărui secțiune transversală are o anumită valoare pentru o presiune a mediului înconjurător dată și este proporțională cu intensitatea curentului din arc. Această parte a arcului electric (care are o luminozitate intensă) este, de fapt, **coloana arcului** și are conductibilitatea electrică cea mai mare, prin ea trecând aproape 95% din curent.

Acest miez este înconjurat de un strat mai gros, dar mai puțin luminos, denumit **aureolă**, a cărui natură diferă, datorită temperaturii mari, de mediul inițial în care s-a produs arcul. Aureola reprezintă un gaz destul de încălzit și luminos, dar *temperatura lui fiind relativ mică, și conductibilitatea lui este mică*.

La temperaturile foarte înalte din coloana arcului, atomii și moleculele gazului capătă viteze foarte mari, respectiv energii cinetice ( $E_c = m \cdot v^2 / 2$ ) exagerat de mari. Prin urmare, la ciocniri apar particule încărcate cu sarcini de semn contrar: electroni și ioni.

Ionizarea termică a gazelor are loc la temperaturi de ordinul a  $8 \cdot 10^3 \dots 10^4 \text{ K}$ , pe când ionizarea vaporilor de metal are loc la  $4000 \text{ K}$ . În arcul electric (care se formează la întreruperea unui curent) există întotdeauna vapori metalici, deci pentru a se produce ionizarea termică a gazelor este necesar ca temperatura în zona centrală să aibă valori de peste  $4000 \text{ K}$ .

### 2.3.3. Procese de deionizare a arcului electric

Se constată că dintre toate tipurile de ionizări, ionizarea termică este aceea care menține arcul electric.

Deci, ***cea mai potrivită măsură pentru stingerea arcului electric este îndepărtarea căldurii din spațiul de arc, adică scăderea temperaturii acestuia.***

Pe de altă parte, scăderea temperaturii gazului din coloana arcului contribuie la *recombinarea particulelor încărcate cu sarcini pozitive și negative*, obținându-se procesul invers ionizării, ***deionizarea***.

Procesul de deionizare în spațiul de arc are loc simultan cu procesul de ionizare și, atât timp cât arcul arde stabil, cele două procese se găsesc în echilibru. În stadiul de aprindere și de dezvoltare a arcului electric, procesul de ionizare este preponderent, pe când în stadiul de stingere a arcului, este important procesul de deionizare.

Procesul de deionizare se realizează atât prin *recombinarea particulelor încărcate electric*, cât și prin *difuzia ionilor în afara spațiului de arc*.

**1. Fenomenul de recombinație:** două particule încărcate cu sarcini electrice pozitive și negative atunci când se ating își neutralizează sarcinile electrice, rezultând particule neutre.

În coloana arcului se recombina ioni de semn contrar. Recombinarea directă a unui electron cu un ion pozitiv este puțin probabilă, întrucât viteza de deplasare a electronilor este de circa 1000 de ori mai mare decât viteza de deplasare a ionilor.

În aceste condiții, recombinația se face cu ajutorul unui al treilea agent: *particulele neutre*.

Există așa-numitele ***gaze electronegative*** (printre care și hexafluorura de sulf  $SF_6$ ), ale căror molecule, prin captarea electronilor formează ioni negativi stabili. După aceea, în coloana arcului, ionii pozitivi și ionii negativi, care au aproximativ aceeași masă și aceeași viteză de deplasare, se atrag reciproc și atingându-se se transformă în particule neutre. *Procesul de recombinație este însoțit întotdeauna și de emisie de căldură.*

Atingerea particulelor care se recombina se face fie pe calea atracției electrostatice, fie datorită agitației termice. Cu cât energia cinetică a particulelor este mai mare, cu atât mai mare este viteza de mișcare și, deci, cu atât mai mică va fi probabilitatea de recombinație a lor.

Intensitatea procesului de recombinație depinde de următorii factori:

- *gradientul câmpului electric* (cu cât gradientul este mai mic cu atât viteza de mișcare a particulelor încărcate este mai mică și cu atât este mai mare posibilitatea de recombinație a lor);

- *natura fizică a gazului;*

- *temperatura gazului în spațiul de arc* (cu cât temperatura este mai mică cu atât intensitatea recombinației este mai mare);

- *presiunea gazului în spațiul de arc* (cu cât presiunea este mai mare cu atât intensitatea procesului de recombinație este mai mare);

- *secțiunea transversală a coloanei arcului* (la secțiuni mici ale arcului electric, recombinația este mai intensă).

În plus, ***o recombinație mai intensă a particulelor încărcate electric s-a observat atunci când arcul vine în atingere cu suprafața unui dielectric solid.***

**2. Difuzia ionilor** este al doilea proces de deionizare a arcului. El constă în deplasarea particulelor încărcate din zona arcului (cu concentrație mare de sarcini electrice) în mediul înconjurător (cu concentrație mai mică de sarcini electrice).

Se știe că, în gaze, orice modificare locală a stării nu poate persista mult timp. Într-un gaz ionizat orice acumulare de ioni sau de electroni (determinată de o cauză oarecare) se va împrăști imediat după apariție, datorită mișcării termice în întregul volum ocupat de gaz.

Legile difuziei se deduc din teoria cinetică a gazelor. De aici rezultă că în cazul repartiției neuniforme a densității sarcinilor electrice pe secțiunea transversală a arcului va apărea un câmp electric care va forța ionii să se miște perpendicular pe axa arcului, părăsind chiar zona acestuia, datorită diferenței mari de temperatură care există între spațiul de arc și mediul înconjurător. Ionii pozitivi care difuzează în mediul ambiant își pierd sarcinile din cauza recombinației cu ionii negativi care se găsesc în mediul înconjurător.

Prin urmare, *difuzia produce o reducere a numărului de ioni din arc, micșorând conductibilitatea electrică a arcului.*

Pentru ca ionii care difuzează în mediul înconjurător să nu formeze în jurul arcului zone cu sarcini pozitive (care ar împiedica mai departe difuzia ionilor pozitivi din arc) este necesar ca recombinația ionilor în mediul înconjurător să fie intensă. În acest scop, *intensificarea recombinațiilor în mediul înconjurător se obține prin suflarea arcului cu ajutorul unui gaz relativ rece și neionizat.* Acest suflaj, măbind diferența de temperatură dintre arc și mediul înconjurător, contribuie direct la intensificarea difuziei. Același rezultat se poate obține și prin deplasarea arcului în mediul ambiant.

Din punct de vedere fizic, difuzia depinde de:

- *diferența de temperatură* dintre temperatura arcului și temperatura mediului înconjurător;

- *lungimea arcului*;

- *raza coloanei arcului*, care variază invers proporțional cu pătratul acesteia.

Temperatura arcului variază brusc de la axa lui spre periferie. Cu cât este mai bruscă căderea de temperatură, cu atât mai repede se micșorează zona de ionizare termică din secțiunea arcului și crește difuzia.

În concluzie, se poate spune că în cazul arcului liber recombinația este importantă, iar difuzia este neglijabilă. Pe de altă parte, în cazul când arc este deionizat puternic printr-un suflaj, iar raza arcului este mult mai mică decât în cazul arcului liber, difuzia începe să devină mai intensă. În cazul arcului care arde în spații înguste sau în canale cu pereți izolanti, recombinația are un rol hotărâtor, crescând foarte mult dacă arc atinge pereții.

Toate aceste observații stau la baza principiilor de stingere a arcului electric.

#### 2.3.4. Caracteristicile de ardere ale arcului electric

După cum s-a arătat în paragrafele anterioare, un arc electric este caracterizat prin parametrii electrici: tensiunea de ardere, intensitatea curentului, căderile de tensiune  $\Delta U_c$ ,  $\Delta U_a$ ,  $\Delta U_l$  și prin parametrii geometrici: lungimea arcului  $l$  și diametrul coloanei  $d$ . Între parametrii electrici și cei geometrici se pot stabili anumite legături.

**Caracteristicile de ardere ale arcului electric** exprimă dependența dintre căderea de tensiune pe arc  $u_a$  și intensitatea curentului prin arc,  $i$ , respectiv lungimea arcului,  $l$  (de obicei reprezintă ecartul dintre contacte).

În **regim staționar**, când arderea arcului electric este stabilă la intensitate de curent constantă ( $i = \text{const.}$ ) și lungime a arcului constantă ( $l = \text{const.}$ ) **caracteristica tensiune-curent**,  $u_a = f(i)$ , în cazul **arcului de curent continuu**, se numește **caracteristică statică**, iar în cazul **arcului de curent alternativ**, **caracteristică dinamică**.

Cea mai utilizată caracteristică statică tensiune-curent a arcului electric de curent continuu este **relația lui Ayrton**, care stabilește o dependență între tensiunea  $u_a$ , intensitatea  $i$  și lungimea  $l$  a arcului electric, de tipul:

$$u_a = \alpha + \gamma \cdot l + \frac{\beta + \delta \cdot l}{i} \quad (2.266)$$

unde  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\delta$  sunt constante ce depind de materialul electrozilor și de mediul de stingere.

Când intensitatea curentului  $i$  este mare, în relația lui Ayrton termenul care conține pe  $i$  la numitor se poate neglija, iar expresia (2.266) se reduce la:

$$u_a = \alpha + \gamma \cdot l \quad (2.267)$$

Pentru modelarea caracteristicii statice tensiune-curent a arcului electric de curent continuu se poate utiliza și **relația lui Rieder**:

$$u_a = a + (b + l) \cdot c \cdot \left( \ln \frac{i}{d} \right)^{-3}, \quad (2.268)$$

unde:  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$  sunt constante de material.


În tabelele următoare se prezintă câteva valori pentru constantele din relația lui Ayrton, respectiv Rieder.

**Tabelul 2.1 – Valori ale constantelor din relația lui Ayrton**

Materialul	$\alpha$ [V]	$\beta$ [VA]	$\gamma$ [V/cm]	$\delta$ [VA/cm]
Cupru	30	10	10	30
Carbon	39	11,7	0,21	1,05

**Tabelul 2.2 – Valori ale constantelor din relația lui Rieder**

Materialul	$a$ [V]	$b$ [cm]	$c$ [V/cm]	$d$ [A]
Cupru	26	1,3	5400	$7,4 \cdot 10^{-3}$
Argint	26	1,1	5400	$7,4 \cdot 10^{-3}$
Wolfram	26	1,6	5400	$7,4 \cdot 10^{-3}$

$u_a$  [V] 

$l = 10 \text{ cm}$

$l = 5 \text{ cm}$

$l = 1 \text{ cm}$

  $i$  [A]



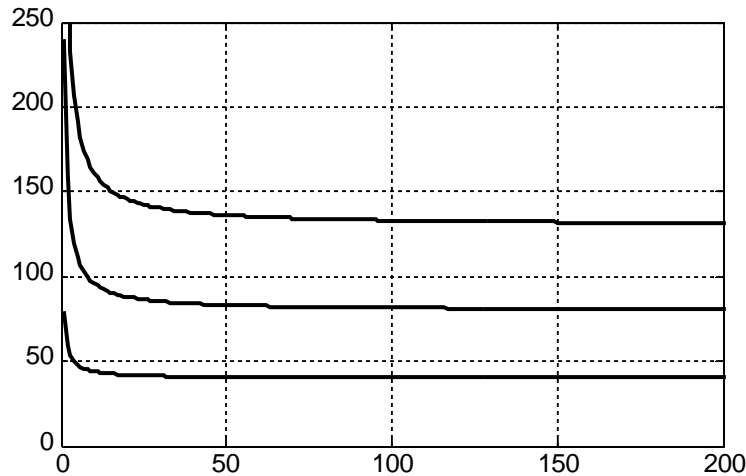


Fig. 2.41 Caracteristicile statice ale arcului electric de curent continuu (relația lui Ayrton).

Analizând alura caracteristicilor din fig. 2.41 se constată că, spre deosebire de căderea de tensiune pe conductoarele metalice, care este proporțională cu curentul, *căderea de tensiune pe arcul electric descrește odată cu creșterea curentului*. Caracterul descendent al curbei  $u_a = f(i)$  se datorează proceselor de ionizare și deionizare care au loc în spațiul de arc.

Când arcul arde în aer liber, la curenți mici, caracteristica  $u_a = f(i)$  are alura căzătoare, iar la curenți mai mari, această curbă devine o dreaptă paralelă cu axa abscisei, corespunzătoare curentului. La densități de curent foarte mari la electrozi, caracteristica poate deveni crescătoare.

**Arcul electric de curent alternativ** spre deosebire de arcul electric de curent continuu se caracterizează printr-un **proces dinamic**.

Proprietățile arcului electric de curent alternativ depind în mare măsură de acțiunea mediului ambiant asupra sa.

În cazul unei acțiuni slabe, ca de exemplu *arderea arcului electric în atmosferă liniștită de aer*, inerția termică a coloanei arcului este așa de mare, încât temperatura gazului din axa arcului electric se modifică puțin în timpul unei semiperioade a curentului alternativ. Ca rezultat al acestui fapt, curentul își schimbă sensul, aproape în același mod ca la trecere sa printr-un conductor metalic. În acest caz trecerea curentului prin zero nu creează nici o proprietate nouă coloanei arcului. Acest arc electric care nu este supus acțiunii dispozitivelor speciale pentru intensificarea deionizării coloanei sale se numește **arc liber**.

Cu totul altfel se comportă coloana arcului de curent alternativ în condiții de deionizare intensă, ca de exemplu *într-un curent de gaz*.

În acest caz diametrul coloanei arcului urmărește aproape sincron variația curentului. La apropiere curentului de zero, coloana arcului se prezintă ca un fir subțire, care poate să se distrugă într-un timp foarte scurt (câteva zeci de microsecunde). În aceste condiții, fenomenul se petrece ca și cum în fiecare

semiperioadă arcul s-ar stinge și s-ar aprinde, iar stingerea definitivă depinde de raportul dintre viteza de restabilire a rigidității dielectrice a coloanei arcului și viteza de creștere a tensiunii de restabilire pe contacte după trecerea curentului prin zero.

O deionizare intensă a spațiului arcului se realizează printr-o acțiune activă a mediului de stingere, cum ar fi suflarea cu gaz sau lichid etc., prin aducerea în contact a coloanei arcului cu pereți izolanti, prin împărțirea lungimii arcului într-o serie de arcuri scurte etc.

Tensiunea arcului poate reprezenta o valoare neglijabilă în raport cu tensiune rețelei (1-2%), în timp ce vârful tensiunilor de aprindere a arcului poate să atingă valori importante.

În comparație cu arcul liber, caracteristica tensiune-curent dinamică a arcului în condiții de deionizare intensă suferă modificări.

În fig. 2.42 sunt arătate pentru comparație caracteristicile tensiune - curent ale unui arc liber (1) cu o deionizare slabă și unui arc cu intensă deionizare a spațiului (2), a cărui tensiune de aprindere este cu mult mai mare decât tensiunea arcului.

În condițiile intensei deionizări, sunt determinante fenomenele legate de momentul trecerii curentului prin zero.

Stingerea arcului de curent alternativ poate fi formulată în general astfel: *dacă rigiditatea dielectrică a spațiului arcului, după ce curentul ajunge la valoarea zero, rămâne tot timpul mai mare decât tensiunea rețelei care se restabilește, arcul se stinge definitiv și invers.*

Exprimarea grafică a acestei situații este arătată în fig. 2.43, în care s-au notat cu *a* curba de restabilire a tensiunii aplicată spațiului de arc după trecerea curentului prin zero, cu *b* și *c* - două curbe de restabilire a rigidității a spațiului.

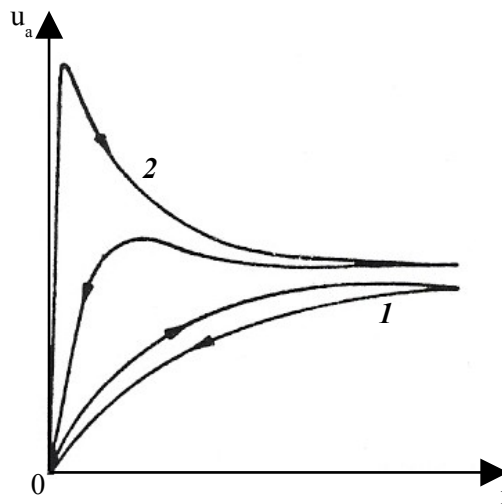
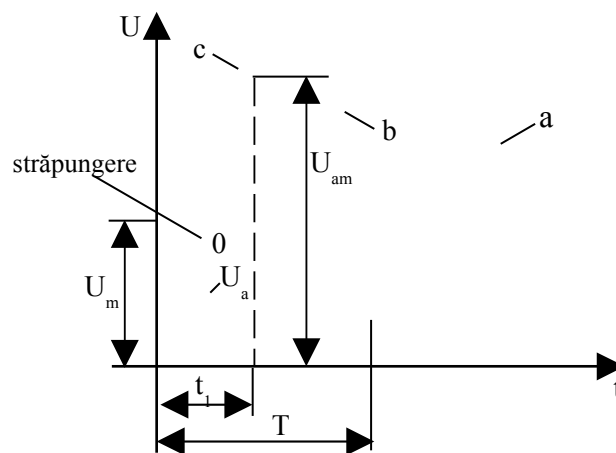
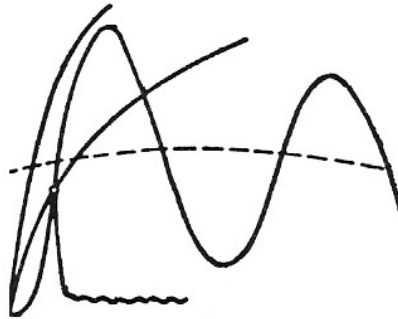


Fig. 2.42 Caracteristica tensiune-curent a arcului de curent alternativ.





**Fig. 2.43** Reprezentarea grafică a stingerii sau a reaprinderii arcului electric după trecerea curentului prin zero.

Coloana arcului după trecerea curentului prin zero păstrează încă o conductibilitate apreciabilă, care scade repede în timp, în cazul stingerii arcului și crește dacă arcul se reaprinde.

De aceea stingerea definitivă sau reaprinderea arcului în condițiile unei deionizări intense a coloanei arcului este determinată de cele două procese rapide - modificarea conductibilității spațiului arcului și a tensiunii care se restabilește la bornele lui.

Formarea rigidității dielectrice a spațiului de arc este un proces determinat în primul rând de acțiunea dispozitivelor de stingere a arcului, de natura mediului în care s-a produs arcul etc.

Formarea rigidității dielectrice a spațiului de arc în condițiile unei deionizări intense este partea principală a fenomenului complex de stingere a arcului electric în curent alternativ. Restabilirea rigidității dielectrice a spațiului de arc se realizează pe diferite căi în funcție de dispozitivele de stingere, de mediul de stingere, de modul de introducere a mediului de stingere etc. Procesul de stingere are loc diferit pentru arcurile electrice scurte și pentru arcurile electrice lungi.

**Stingerea arcului scurt.** Se va examina momentul treceri curentului prin zero în arcul care arde între electrozii aflați la o distanță foarte mică unul de altul (circa 1 mm).

Arcul va reapărea în semiperioada următoare a curentului alternativ dacă se va aplica o tensiune suficientă pentru a asigura gradientul necesar lângă noul catod la schimbarea polarității.

Se știe că pentru smulgerea de electroni din suprafața catodului este necesar un gradient de tensiune de circa 300 kV/cm. Dacă gradientul ar rămâne constant în lungul spațiului de arc, atunci pentru ca să se producă un arc pe un spațiu de 1 mm ar fi necesar o tensiune de circa 30 kV. În realitate, arcul se reaprinde dacă tensiunea trece de 130-250 V datorită repartizării neuniforme a tensiunii în lungul spațiului de arc.

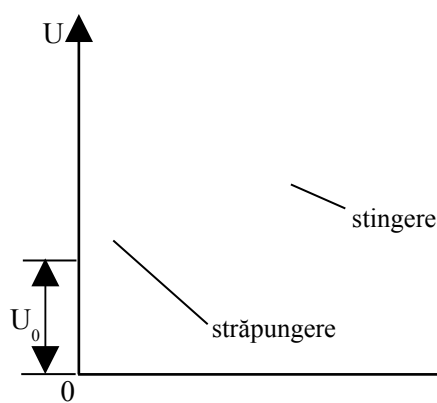




Fig. 2.44 Reprezentarea grafică a stingerii sau reaprinderii arcului electric scurt.

Rigiditatea inițială  $U_0$  depinde de starea electrozilor și de materialul lor. Stingerea arcului scurt ca și a arcului lung depind de viteza de restabilire a tensiunii aplicată spațiului de arc, precum se vede în fig. 2.44.

O caracteristică de stingere a arcului scurt este influența importantă a rigidității inițiale a spațiului scurt asupra procesului de stingere a arcului.

Dacă amplitudinea tensiunii de restabilire întrece rigiditatea dielectrică a spațiului, atunci este necesar pentru stingerea arcului ca acesta să fie împărțit în mai multe spații, legate în serie. În cazul legării în serie a mai multe spații, rigiditatea unei astfel de coloane poate să nu fie egală cu suma rigidităților spațiilor singulare. Valoarea tensiunii totale pentru reaprinderea arcului într-un astfel de spațiu multiplu este influențată de repartitia neuniformă a tensiunii de restabilire pe fiecare spațiu separat. Gradul de neuniformitate a repartitei tensiunii de restabilire este influențat de capacitățile diferitelor spații față de pământ.

Pentru mărirea rigidității unui astfel de dispozitiv este necesar să se uniformizeze repartitia tensiunii în lungul coloanei, ceea ce se obține prin șuntarea elementelor separate sau a grupelor de elemente cu rezistențe sau capacități.

Dispozitivele de stingere cu spații scurte și-au găsit o aplicare destul de răspândită în aparatele de joasă tensiune. La întreruptoarele de înaltă tensiune aceste dispozitive se folosesc relativ mai puțin și anume la tensiuni medii.

**Stingerea arcului lung.** La arcurile electrice lungi fenomenele de lângă electrozi au o importanță secundară. Într-adevăr dacă în acest caz arcul se stinge la câteva mii de volți, tensiunea de ordinul 250 V, necesară pentru începerea descărcării lângă suprafața catodului, nu are nici o importanță cantitativă. Procesul de restabilire a rigidității dielectrice în spațiul arcului lung se petrece cu totul altfel decât în cazul arcului scurt și anume prin deionizarea gazelor care alcătuiesc coloana lui prin împărțirea acesteia.

În cazul ionizării active, coloana arcului de curent alternativ este supusă acțiunii intense a mediului ambiant, în care disipă continuu puterea pe care o primește din rețea. Ca rezultat al acestor procese, gradul de ionizare al coloanei reziduale poate să crească sau să descrească.

Din acest punct de vedere, începutul stingerii arcului trebuie considerat înainte de trecerea prin zero, bilanțul energetic al coloanei arcului devine negativ, adică

puterea disipată întrece puterea primită și rezistența spațiului de arc începe să crească. Când curentul atinge valoarea zero se întrerupe complet primirea de putere în arc, dar disiparea ei continuă cu intensitate mare.

Pentru stingerea arcului electric este necesar să se preia în special rezerva de energie aflată în coloana reziduală a arcului după trecerea curentului prin zero, întrucât temperatura înaltă a gazului este sursa de noi ioni și electroni atât timp cât temperatura nu scade sub nivelul ionizării termice.

Se menționează că scăderea mai departe a temperaturii contribuie activ la dispariția purtătorilor de sarcină rămași în coloana arcului prin intensificarea recombinării lor.

Atomii formați sunt mai mobili și difuzează ușor din coloana arcului în spațiul înconjurător. În zona temperaturilor joase (pe suprafața coloanei arcului și dincolo de limitele ei), atomii se unesc din nou și se recombina în molecule cedând căldură. Astfel se realizează transportul de căldură din zona arcului în spațiul înconjurător. În momentul trecerii curentului prin zero și în timpul restabilirii tensiunii, coloana arcului lung nu-și pierde total conductibilitatea.

Această conductibilitate, numită și *conductibilitate reziduală*, are în momentul trecerii curentului prin zero o valoare apreciabilă, apoi scade și după aceasta, fie continuă să scadă pînă la stingerea totală a arcului, fie că după atingerea unei valori minime începe din nou să crească. În întreruptoarele de înaltă tensiune, curentul de arc este funcție nu numai de timp, ci și de distanța între contactele care se deplasează. Din această cauză, parametrii arcului electric: temperatura, presiunea și compoziția gazelor, diametrul coloanei arcului și turbulența depind atât de timp, cât și de condițiile locale din întreruptor.

### 2.3.5. Principii de stingere a arcului electric

Echipamentele electrice de comutație, destinate a efectua comutații sub sarcină (în domeniul arcului electric) sunt echipate cu incinte, numite **camere de stingere**.

În camera de stingere "se dezvoltă" și "se stinge" arcul electric. **Funcțional, camerele de stingere au rolul de a răci intensiv arcul electric și de a crea instabilitate în arderea lui.** Aceste obiective pot fi realizate prin folosirea anumitor *principii de stingere a arcului electric*, principii care determină forma constructivă a camerei de stingere.

Utilizarea unuia sau altuia dintre principiile de stingere a arcului electric se stabilește în funcție de o serie de caracteristici, precum: felul curentului (continuu sau alternativ), de parametrii sarcinii (tensiunea nominală, intensitatea curentului de întrerupt), de natura sarcinii (rezistivă, inductivă, capacitivă), de regimul de lucru (durata relativă de conectare, frecvența de conectare) etc.

În continuare se prezintă cele mai importante principii de stingere a arcului electric.

#### 2.3.5.1. Efectul de electrod. Efectul de nișă. Suflajul magnetic

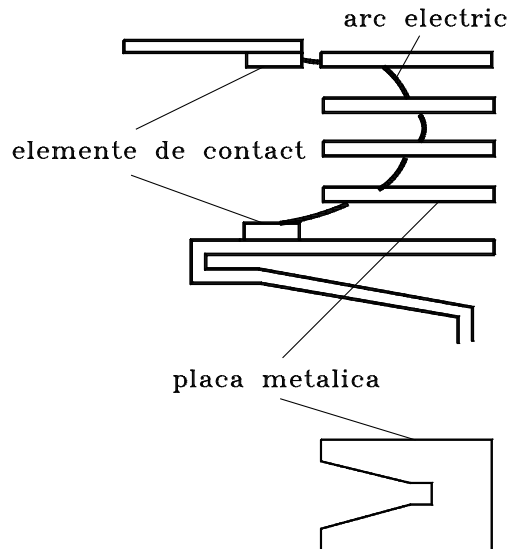


Fig. 2.45 Efectul de electrod cu plăci metalice.

**Efectul de electrod** constă în divizarea arcului în  $n$  segmente (cu ajutorul unor plăcuțe metalice), în scopul creșterii de  $n$  ori a căderilor de tensiune la electrozi. Astfel, în cazul împărțirii arcului în  $n$  segmente, condiția stingerii arcului este:

$$n(\alpha + \gamma \cdot l) > u_a \quad (2.269)$$

unde  $u_a$  este tensiunea de ardere a arcului electric.

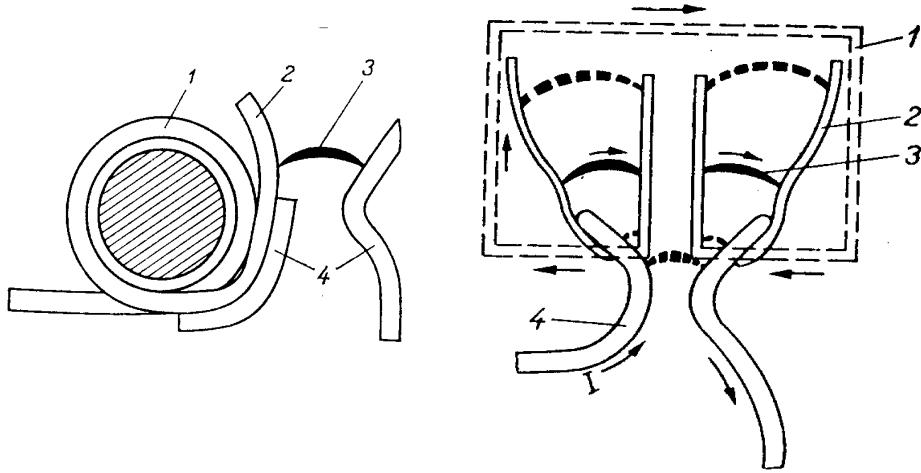
Efectul de electrod nu este aplicat la stingerea arcului electric de curent continuu deoarece eficiența unei camere de stingere construită după acest principiu este foarte redusă. Stingerea arcului de curent continuu are loc prin lungirea arcului, cât și prin contactul (atingerea) lui cu pereții reci ai camerei de stingere.

*Efectul de electrod este frecvent utilizat la stingerea arcului electric de curent alternativ.* În acest caz, stingerea arcului electric este urmată de trecerea naturală prin zero a curentului, astfel încât tensiunea (pe interval) între două plăcuțe, necesară stingerii arcului este de circa 100-200 V. Numărul intervalelor de stingere se calculează ținând seama de valoarea tensiunii de restabilire.

*Dispoziția plăcilor metalice într-o cameră de stingere cu efect de electrod este arătată în fig. 2.45.*

Plăcuțele sunt din oțel zincat (pasivizat) și au forma literei V, pentru ca, sub acțiunea nișei astfel formate, arcul să fie împins în camera de stingere, spre a fi divizat. În consecință, prin crearea *efectului de nișă*, eficiența camerei de stingere este mărită.

Principiul efectului de electrod este aplicat în construcția camerelor de stingere de la contactoarele electromagnetice și de la întreruptoarele de c.a. de joasă tensiune.



**Fig. 2.46** Stingerea arcului electric cu ajutorul suflajului magnetic:

1 - bobina de suflaj; 2 - plăcuțe metalice; 3 - arcul electric; 4 - elementele de contact.

Împingerea arcului electric în camera de stingere se poate face cu ajutorul **sufrajului magnetic**, adică cu ajutorul unui câmp magnetic exterior  $B$  (perpendicular pe direcția arcului) creat de o bobină parcursă chiar de curentul care trebuie întrerupt (ca în fig. 2.46). În aceste condiții, arcul electric va fi supus *acțiunii forței electromagnetice*  $F = B \cdot l \cdot i$  care, lungindu-l, tinde să-l introducă în camera de stingere.

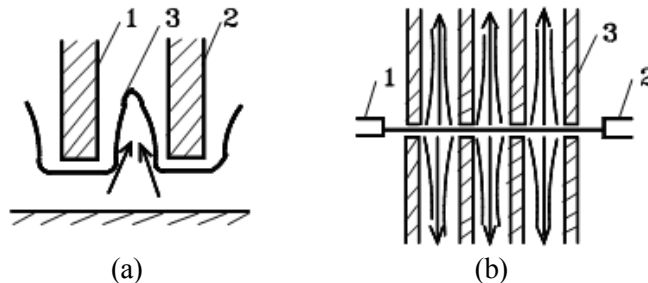
Principiul suflajului magnetic este aplicat în construcția contactoarelor de curent continuu, de joasă tensiune.

#### 2.3.5.2. Curenții de plasmă. Deionizarea în contact cu pereții reci.

Un arc electric (care arde într-un gaz) nu își menține coloana sub formă cilindrică deoarece piciorul arcului se găsește pe un material conductor (metal), unde densitatea de curent este mare, iar coloana arcului se dezvoltă într-un gaz, care este un mediu mai puțin conductor. Ca urmare, diametrul coloanei în gaz va depăși sensibil diametrul din dreptul electrozilor, iar arcul electric va prezenta o umflare în zona centrală.

Această modificare de diametre, pe măsură ce se trece la altă secțiune transversală în coloana arcului, determină o *asimetrie de câmp magnetic și de densitate de curent*, adică o modificare a forțelor Lorentz față de cazul modelului cilindric.

Efectul acestei asimetrii constă în formarea de curenți de plasmă către axa de simetrie transversală a arcului electric. În zona acestei axe, curenții de plasmă provenind de la cei doi electrozi se izbesc și dau naștere unei expulzări de plasmă în planul de simetrie transversal.



**Fig. 2.47** (a) Strangularea arcului electric; (b) răcirea plasmelor în contact cu pereții reci.

(a) 1, 2 – plăci izolante; 3 – arcul electric.

(b) 1, 2 – elemente de contact; 3 - pereți ceramici izolanți cu orificii.

Formarea curenților de plasmă are drept consecință eliminarea unei mase de plasmă și, deci, deionizarea arcului.

Sub acest aspect, în tehnica întreruperii se urmărește formarea de zone strângulate de arc electric, ca de exemplu în fig. 2.47a, unde arcul 3 este strângulat de plăcile izolante 1 și 2. Disimetria astfel formată determină curenți de plasmă după direcțiile marcate cu săgeată. În fig. 2.47b arcul electric (apărut între elementele de contact 1 și 2) este obligat să parcurgă orificii (strangulări) practicate în pereții ceramici izolanți 3. Aici, expulzarea de plasmă (care are loc după direcția săgeților) este însoțită de răcirea plasmelor eliminate, în contact cu pereții ceramici reci.

Echipamentele de comutație la care se aplică principiul răcirii arcului electric în contact cu pereții reci sunt contactoarele și întreruptoarele de curent continuu de joasă și de medie tensiune.

### 2.3.5.3. Expandarea. Jetul de lichid. Jetul de gaz.

Principiul expandării asociat cu jetul de lichid este folosit la stingerea arcului electric cu ajutorul unui mediu lichid, cum este uleiul mineral (care are și bune proprietăți electroizolante). În acest caz, energia arcului este folosită parțial la vaporizarea uleiului și, deci, la formarea unei presiuni de 30-100 bar în camera de stingere. Prin aceasta se realizează o conductivitate termică sporită, care permite transferul căldurii din coloana arcului electric către pereții camerei de stingere.

În cazul curentului alternativ, intensității maxime a curentului îi corespunde o presiune locală maximă, după care, odată cu scăderea curentului și presiunii, are loc o vaporizare (expandare). Acest proces de expandare este reluat de 2-3 ori, până când presiunea în camera de stingere a crescut suficient pentru a determina stingerea arcului electric la trecerea prin zero a curentului.

La intensități mici ale curentului, cantitatea de gaze este insuficientă pentru răcirea arcului electric și, de aceea, se creează un jet de lichid dirijat asupra arcului electric. Principiul expandării asociat cu jetul de lichid este aplicat în construcția camerelor de stingere de la întreruptoarele cu ulei puțin de medie și de înaltă tensiune.

**Jetul de gaz.** Conductivitatea termică relativ redusă a aerului atmosferic (din cauza conținutului mare de azot), ca și rigiditatea dielectrică redusă (20-30 kV/cm, în



câmp omogen) sunt caracteristici care nu oferă posibilitatea obținerii de performanțe ridicate în cazul comutației curenților intensi (la tensiuni înalte) în aerul atmosferic.

În opoziție cu acesta, un mediu gazos, cum este hexafluorura de sulf ( $\text{SF}_6$ ), cu autosuflaj, utilizat la presiuni suficient de mari (10-30 bar), determină răcirea arcului electric și refacerea rigidității dielectrice în camera de stingere după o întrerupere reușită. Jetul de gaz folosit la stingerea arcului electric poate fi dirijat longitudinal (în lungul arcului electric) sau transversal. Întreruptoarele cu  $\text{SF}_6$  au performanțe ridicate și folosesc atât principiul jetului axial, cât și principiul jetului radial.

#### 2.3.5.4. Vidul avansat. Materialul granulat

**Vidul avansat.** Principiul vidului avansat în camerele de stingere îmbină două idei de bază: 1) rigiditate dielectrică sporită la distanțe extrem de reduse între contacte și 2) dezvoltarea arcului electric în vapori metalici proveniți din eroziunea fină a elementelor de contact.

Rigiditatea dielectrică sporită se datorează acțiunii legii lui Paschen în domeniul  $pd=10^{-4} \text{ mbar} \times (4-20) \text{ mm}$ . La presiuni atât de reduse, parcursul mediu liber  $\lambda$  al electronului este superior dimensiunii liniare a camerei de stingere a întreruptorului cu vid și, ca urmare, străpungerea devine puțin probabilă.

Arcul electric format la separarea elementelor de contact este o plasmă de vapori metalici, care se dezvoltă în vidul avansat.

Procesele fizice în fața catodului rămân aceleași ca la orice arc electric. *Caracteristic arcului electric în vid avansat este difuzia extrem de rapidă a vaporilor metalici și, deci, a plasmei care, în contact cu pereții reci ai unui ecran, se condensează și, astfel, vidul este refăcut.*

Toate echipamentele de comutație în vid au tendința de a smulge (tăia) curentul din arc electric care, astfel, nu se mai stinge la trecerea naturală prin zero, ci mai devreme. Refacerea rigidității dielectrice, după o întrerupere, se efectuează extrem de rapid, datorită difuziei și condensării vaporilor metalici.

Realizarea echipamentelor de comutație cu stingerea arcului electric în vid avansat a fost posibilă prin progrese tehnologice în direcția realizării de lipituri metal-sticlă, metal-ceramică și în direcția obținerii de noi materiale pentru contacte. La echipamentele cu comutație în vid, pe lângă condițiile normale pe care trebuie să le îndeplinească un contact, se mai cere ca din el să se poată dezvolta, în prezența arcului electric, o cantitate suficientă de vapori metalici, pentru a nu se produce smulgerea timpurie a curentului. Principiul vidului avansat se aplică în construcția întreruptoarelor de medie tensiune și (mai nou) chiar și la înaltă tensiune.

**Materialul granulat.** Stingerea arcului electric în contact cu granule din material refractar este un principiu utilizat în construcția siguranțelor fuzibile. În aceste echipamente arc electric apare după topirea, provocată de trecerea curentului de scurtcircuit, a benzilor sau firelor așezate în mediu granulos (nisip de cuarț). Transferul de căldură de la plasmă la granulele de nisip se realizează prin conducție termică, arc se răcește, sfârșind prin a se stinge.